

As ações de forças da escada de acesso ao silo fundo cônico elevado metálico durante a atuação do vento

Jivago Fabro Arcaro (1), Prof. Me. Estevan Grosch Tavares (2), Prof. Dr. Júlio Alexandre de Matheucci e Silva Teixeira (3)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) jivago_arcaro@unescc.net, (2) estevangt@unescc.net, (3) j.alexandre@unescc.net

Resumo: Os silos fundos cônicos elevados metálicos de chapas onduladas são estruturas de armazenagem em curtos períodos de tempo em uma unidade de recebimento de grãos. São as mais utilizadas no Brasil. As principais ações de forças variáveis que atuam sobre os silos são as pressões devido à densidade e o descarregamento dos produtos armazenados e a pressão do vento devido à precipitação climática, sendo esta a principal ação crítica quando se encontra vazio. O aço tem grande resistência à tração e compressão, tendo uma eficiência estrutural na geometria cilíndrica. É também um material leve, nestas estruturas, comparado ao concreto e à madeira, consequentemente gerando uma maior instabilidade global e local. A estrutura metálica que sustenta o silo fundo cônico tem como função suportar todas as ações de forças que atuam na estrutura, estabilizando a carga nas fundações. Em muitos casos, a escada de acesso ao silo não é considerada nos cálculos das ações de forças de vento. Com a finalidade de avaliar a ação dessas forças, e observar a variação das cargas da escada quando fixadas no silo, foram realizados neste trabalho estudos teóricos e experimentais. O trabalho foi desenvolvido em ensaios com um protótipo do modelo *SFC 4508* de um silo fundo cônico metálico fabricado por uma empresa de silos do município de Araranguá/SC em escala reduzida 1/30 em um túnel de vento da Universidade do Extremo Sul Catarinense, com o objetivo de determinar os dados dos coeficientes de arrasto em função no número de Reynolds, comparando em diferentes graus de posicionamento da escada de acesso em relação à direção do vento em determinadas velocidades. Concluindo assim que a escada em torno do silo tem a menor força de arrasto comparada com o silo cilíndrico sem a escada.

Palavras-chave: silo fundo cônico; escada de acesso; ação de forças; túnel de vento; engenharia civil.

Action forces exerted on a access ladder of an elevated conic bottom silo during wind gusts

Abstract: The elevated conic bottom silo of corrugated steel metal is the storage structure type most used for short time grain storing around storage centers in Brazil. The main action of variable forces that a silo can suffer are pressures caused by the density and unloading of the grains stored in it, as well as the wind pressure caused by the change on the climate. The wind is the main causer of pressure and it specially happens when a silo is empty. Even though the steel used to make these silos has great resistance to the traction and to compression forces it is a light type of material when compared to concrete and wood, which causes this type of storage unit to be more susceptible to bigger instability. The metal structure which supports the conic bottom silo has as its main purpose to hold all the forces that are generated against a silo, dissipating them into the foundations and stabilizing the silo. In many cases the silo access ladders are not considered in the calculations for wind forces impact. This academic experiment was developed with the intension to evaluate the actions of these forces and observe the variation of the forces on access ladders when they are attached to a silo. Using a conic bottom silo made and assembled by Industrial Pagé as reference for this project, this silo was turned into a 3d model of a scale 1/30 and put through a series of tests using a wind tunnel equipment that belongs to the Universidade do Extremo Sul Catarinense. The purpose of this experiment was to establish coefficient data of dragging in relation to the number of Reynolds comparing different degrees of positioning of the access ladder in relation to the wind direction during different wind speeds. The results showed that the ladder attached around the silo suffers less dragging forces when compared to the forces exerted on the same silo without the access ladder.

Key-words: conical bottom silo; access ladder; action of forces; wind tunnel; civil engineering.

Introdução

Os silos fundos cônicos elevados conceituam-se como construções destinadas ao armazenamento de grãos a granel, normalmente utilizados na agricultura, indústria e portos, entre outros. São cuidadosamente desenvolvidos obedecendo a critérios indispensáveis em

uma unidade de armazenagem, tais como: desempenho, eficiência e facilidade de operação, além de ser caracterizados por células ou compartimentos estanques e herméticos, que possibilitam o mínimo de incidências ou trocas de influências do meio externo com o ambiente de estocagem.

De acordo com a INDUSTRIAL PAGÉ LTDA (2015a), o silo fundo cônico elevado oferece condições e técnicas para a conservação do produto. Os grãos armazenados sem o processo de secagem e limpeza, tendem a aquecer até o ponto de comprometer a sua qualidade. A função dos silos é manter controlável as características físico-químicas e biológicas da massa de grãos armazenados.

Os silos metálicos são construídos por chapas laterais galvanizadas e onduladas, que resistem aos esforços de tração. Também compõem a estrutura as colunas de reforço, denominado montantes, que devem suportar as cargas provenientes do atrito grão-parede, cargas devido ao peso próprio da estrutura e cargas induzidas pelo vento.

Conforme Palma (2005), entre 1870 e 1880 foram construídos os primeiros silos esbeltos, e os calculistas da época pensavam que a pressão dos grãos armazenados era igual a dos líquidos.

As pressões que atuam nas paredes do corpo são devidas às propriedades físicas dos tipos de produtos que serão armazenados, da forma geométrica do silo devido à atuação do vento em sua superfície externa e do tipo de fluxo que se formará durante a descarga dos grãos, entre outros, conforme EUROCODE 1 (1995) e pela Norma AS3774 (1996), em que são fornecidos valores mínimos e máximos.

Roberts (1884) *apud* Palma (2005), realizando testes em protótipos em escala reduzida, determinou que as pressões nas paredes do silo não aumentavam linearmente em relação à altura, onde parte do peso do grão armazenado é transferida para as paredes por atrito. Assim as pressões nas paredes na parte inferior do silo são menores que as exercidas pelos líquidos.

O silo estudado neste artigo é classificado em *SFC* 4508, para armazenamento de milho debulhado com 3,0% de grãos danificados, 5,0% de grãos quebrados e material estranhos, teor de umidade em 20%, peso específico de 837,8 kg/m³, e instalados para a região que tem a maior atuação de vento no Brasil de acordo com a norma NBR 6123 (1988).

Conforme INDUSTRIAL PAGÉ LTDA (2015a), os silos são identificados utilizando-se uma nomenclatura formada por letras e números, que identifica utilização, o diâmetro e o número de anéis do corpo do silo. Assim, a nomenclatura *SFC* 4508 apresenta os seguintes dados:

- ✓ *SFC* = silo fundo cônico;
- ✓ 45 = diâmetro do silo de 4,58m;
- ✓ 08 = número de anéis do corpo do silo.

De acordo com INDUSTRIAL PAGÉ LTDA (2015a), os silos fundo cônicos elevados, conhecidos como silos pulmões, necessitam de uma estrutura para a elevação acima do nível “0”, evitam a construção de galerias de transportadores, já que o transportador fica abaixo do cone e acima do nível “0”, dispensam o uso de roscas varreduras e a descarga total por gravidade e têm por objetivo conservar os grãos enquanto aguardam a secagem feita por máquinas secadoras. Se forem instalados antes das máquinas de pré-limpeza, funcionarão como um ponto de espera para que os grãos sejam limpos. Usa-se esta estratégia quando a velocidade de recebimento de grãos é muito alta e não há tempo de esperar o produto passar pelas máquinas, ou quando a quantidade de máquinas for pequena.

O fluxograma da Figura 1 mostra o esquema de uma unidade padrão de recebimento de grão, desde a chegada do produto das áreas cultivadas até a expedição para outras unidades de processo de beneficiamento.

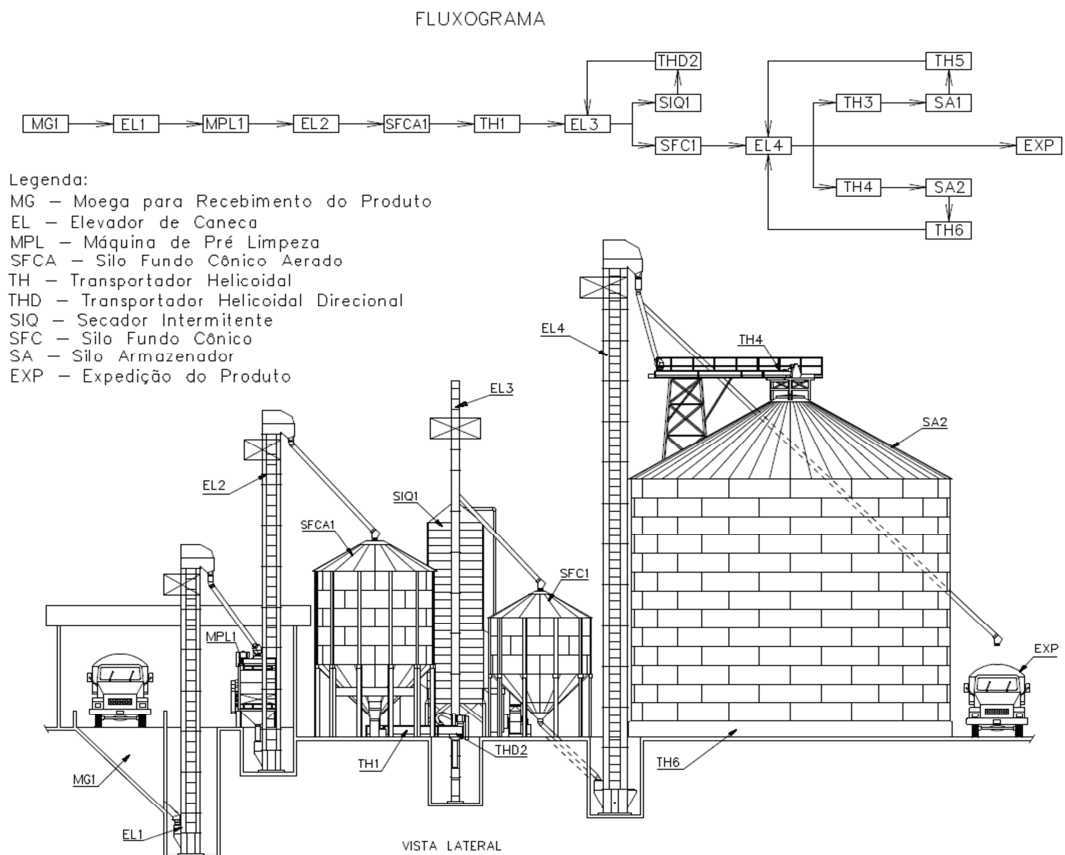


Figura 1. Fluxograma e *layout* de uma unidade padrão de recebimento de grão (Fonte: autores, 2019).

Como pode-se ver na Figura 2, o silo é composto pelos seguintes componentes de acordo com a norma NBR TB-377 (1990):

- ✓ Tampa;
- ✓ Corpo;
- ✓ Cone de descarga;
- ✓ Estrutura metálica;
- ✓ Escada e plataforma de acesso.

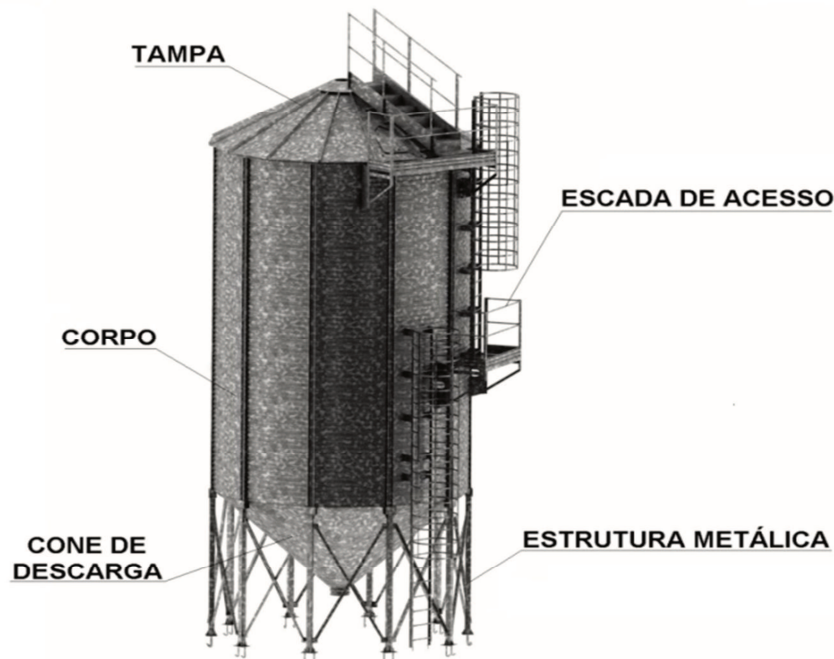


Figura 2. Silo fundo cônico do modelo *SFC 4508* renderizado (Fonte: autores, 2019).

Conforme INDUSTRIAL PAGÉ LTDA (2015b), a tampa do silo é fabricada em painéis triangulares de chapas galvanizadas corrugadas e com bordas nervuradas. Sua inclinação é de 30° para evitar o acúmulo de água e reduzir a ação das forças do vento, e são dotadas de escada lateral com corrimão, para acesso ao centro da tampa para a manutenção do sistema de carregamento do silo. As tampas têm porta de inspeção para a manutenção na parte interna do silo. Todas as uniões das peças do corpo são feitas por parafusos e porcas, e a vedação é feita com arruela Neoprene e massa de calafetar.

O corpo do silo é constituído basicamente por chapas onduladas e corrugadas, para dar maior resistência ao conjunto, e colunas de reforço vertical (montantes), que são montadas pelo lado externo do silo, tendo um formato que proporciona uma resistência adequada à sustentação do silo. Todas as uniões das peças do corpo são feitas por parafusos e porcas e a vedação é feita com arruela Neoprene e massa de calafetar. No corpo do silo deverá ser instalado um controle de nível, fixado na primeira chapa superior do corpo para evitar excesso



de carga no interior do silo. Ele é acionado por meio do contato com o grão e sinaliza no quadro de comando que o silo está cheio.

O cone de descarga sustenta todo o peso do produto e é fabricado com painéis lisos de chapas galvanizadas. Sua inclinação é de 45° para evitar o acúmulo de produto dentro do silo e centraliza toda a descarga no seu centro. Todas as uniões das peças do corpo são feitas por parafusos e porcas, e a vedação é feita com arruela Neoprene e massa de calafetar.

A estrutura metálica sustenta todo o peso da tampa, corpo, cone, escada e plataforma de acesso, o peso da massa de grão, além de todas as reações das cargas que o silo transmite, sendo fabricada com perfis laminados a frio no pilar e nos travejamentos conforme normas NBR 8800 (2008) e NBR 14762 (2010). Todas as uniões das peças do corpo são feitas por parafusos, porcas e arruelas.

O silo está equipado com escadas e plataformas externas, conforme a Norma Regulamentadora NR-12 (2007) e escada de acesso interno. As escadas são feitas por degraus de tubo galvanizado, e as colunas, vigas de encosto e arcos de proteção são fabricadas em chapa galvanizada, e montadas com parafusos, porcas e arruelas. As plataformas são produzidas com piso antiderrapante, as colunas, vigas de encosto e rodapés são fabricadas em chapa galvanizada, os corrimões com tubo galvanizado, e todas as ligações são feitas com parafusos, porcas e arruelas.

As capacidades dos silos atendem às necessidades das unidades de armazenagem de qualquer tipo de cereal a granel. Assim, para este modelo de silo, têm-se os seguintes dados conforme norma NBR TB-374 (1990), conforme Figura 3:

- ✓ Capacidade total do silo de 142 m^3 ;
- ✓ Volume convertido em sacas de 60kg de milho ($837,8 \text{ kg/m}^3$ a umidade de 20%) de 1982,79 sacas;
- ✓ Diâmetro do corpo de 4,58 m;
- ✓ Altura da tampa do silo de 1,368 m;
- ✓ Altura do corpo do silo de 7,315 m;

- ✓ Altura da estrutura metálica de 3,147 m;
- ✓ Altura do cone de descarga do silo de 2,271 m;
- ✓ Altura total de 11,83 m;
- ✓ Diâmetro de entrada do produto de 0,32 m;
- ✓ Diâmetro de saída do produto de 0,32 m;
- ✓ Peso total da estrutura da escada de 212,507 kg;
- ✓ Peso total do silo vazio de 3294,66 kg;
- ✓ Peso total do silo cheio de 122262,26 kg.

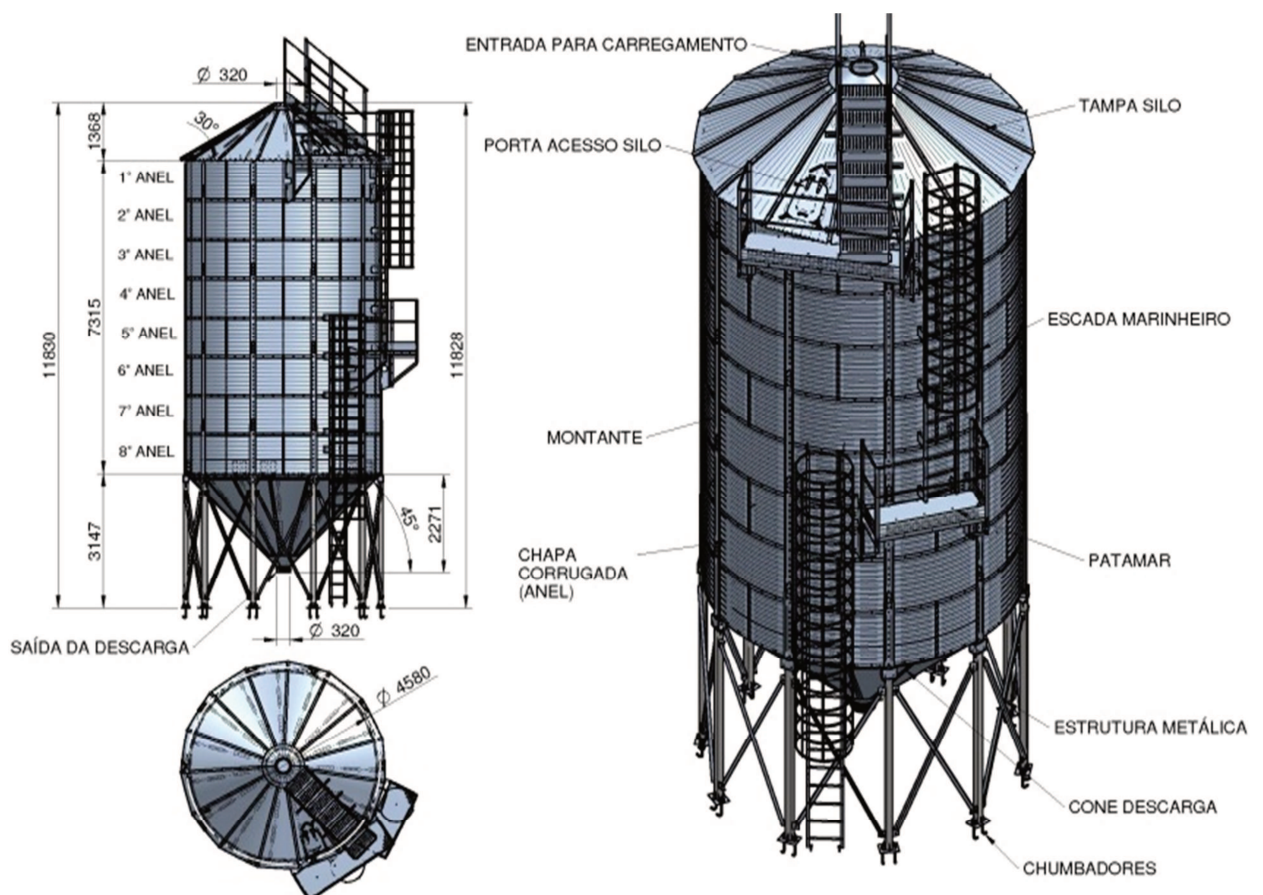


Figura 3. Projeto detalhado no *software* Solid Edge ST9 do SFC 4508 (Fonte: autores, 2019).

Quando vazios, os silos reduzem as cargas provenientes da densidade do produto armazenado e as pressões localizadas nas paredes do silo, reduzindo assim sua flexibilidade estrutural.

O vento é a ação de um deslocamento de ar no sentido horizontal, originário de densidade e pressão na horizontal em uma determinada intensidade, tempo, direção e espaço, sendo influenciado pelas características geométricas e estado de aquecimento da superfície, deslocando-se de áreas de maior pressão, onde o ar é mais frio, para áreas de menor pressão, onde o ar é mais quente, assim a partir da proporção da diferença de pressão nos dá a velocidade do vento.

A norma brasileira NBR 6123 (1988) considera que a velocidade do vento depende da rugosidade da superfície devido aos obstáculos que a área tem durante a passagem na distância vertical. Quanto mais próximos da superfície, maior será o atrito e menor a velocidade do vento. Ao encontrar uma estrutura, essas ações de intensidade modificam-se, causando forças sobre a estrutura por onde o fluido passa.

A atuação dos ventos quando o silo está vazio, é a situação mais crítica, por ser uma estrutura leve, e de grandes dimensões em relação peso-próprio e área, podem ocorrer perdas de estabilidade local e global da estrutura.

Segundo Carlito e Andrés (2005), deve-se projetar o silo contra o arrancamento da sua tampa e dimensionar as chapas onduladas corrugadas a resistirem à flambagem elástica e, se possível, colocar anéis de enrijecimento para garantir a estabilidade global do silo. Também devem ser verificadas as forças de arrancamento nos chumbadores do silo, bem como o dimensionamento da placa da base para os efeitos de alavanca.

Os autores acrescentam que os modos de ruptura mais comuns devidos ao vento, nestas estruturas são a ovanização do corpo do silo devido ao amassamento da parede (Figura 4(a)) e o tombamento devido ao arrasto (Figura 4(b)).

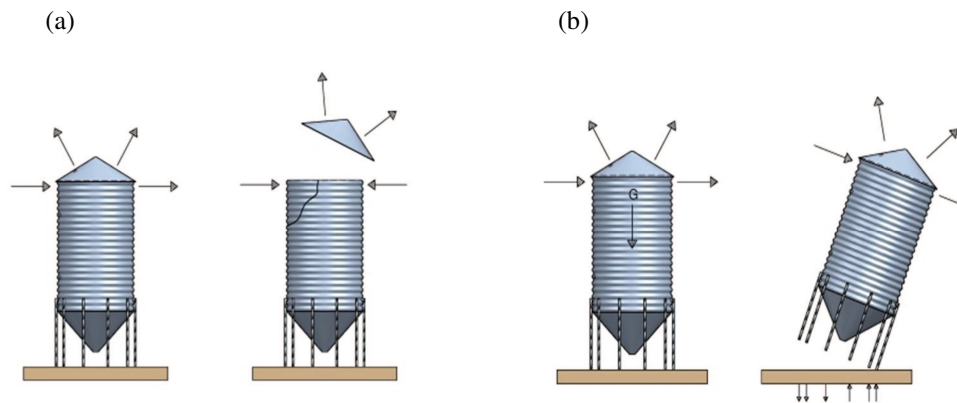


Figura 4. Modos de ruptura nos silos: (a) falha por arrancamento da cobertura e ovanização do corpo (Fonte: autores, 2019), (b) falha por tombamento do silo, devido à força de arrasto (Fonte: autores, 2019).

A presença de edificações próximas pode influenciar diretamente na construção em relação a ação do vento sobre uma estrutura, alterando sucções, forças e momentos. Esses efeitos, apesar de mensuráveis, são específicos de cada situação. Assim, normas propõem em geral coeficientes aerodinâmicos que se referem a edificações isoladas (CARPEGIANI, 2004).

A ação das cargas de vento nas escadas em muitos casos é desconsiderada. Assim, o objetivo deste estudo é avaliar os efeitos da escada de acesso no silo vazio, quando se tem a atuação do vento.

Deste modo, foi realizado um estudo por meio de ensaios em um protótipo em escala 1/30 de um silo fundo cônico do modelo *SFC 4508* junto à Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC).

Com o estudo no túnel de vento, são avaliadas os coeficientes de arrastos do silo em função do número de Reynolds, com o objetivo de analisar sua estabilidade local e global e o comportamento da escada na estrutura do silo.

Segundo Robert, Alan e Philip (2006), um teste de modelo reduzido pode ser considerado útil quando são fornecidas forças, momentos e cargas dinâmicas que existiriam

no protótipo em tamanho real. O modelo deve atender à semelhança geométrica, em que todas as dimensões lineares do modelo devem ser relacionadas com as correspondentes no protótipo por um fator de escala constante. Além disso, os escoamentos devem ser cinematicamente semelhantes, e as velocidades em pontos correspondentes devem ter a mesma direção e sentido.

Materiais e métodos

Neste tópico são mostrados os materiais, a forma de fabricação do protótipo e os métodos utilizados para a geração dos valores de similaridade do coeficiente de arrasto. Os materiais são escolhidos para simular o comportamento da escada e do silo com atuação de vento, atendem à semelhança de geometria comparados com o real.

O túnel de vento em que estudaremos o protótipo tem o comprimento de 7 m e seção quadrada de $70\text{ cm} \times 70\text{ cm}$, com velocidade máxima de 58 km/h dentro do módulo central de experimento.

Os materiais utilizados para a fabricação do protótipo foram a madeira, alumínio, PVC e aço. Todos os componentes para a montagem do silo foram fabricados em escala reduzida 1/30.

O material utilizado para fabricar a tampa e o cone foi o alumínio, passados pelos processos de corte e calandra para obter-se a geometria. O corpo foi construído em lata de conserva, pois tem o ondulado similar ao real e cortado na medida da escala reduzida. Os pilares da estrutura foram feitos de barra rosca de aço com porca na ponta, para a regulagem do nível do protótipo na bancada, e a bancada de madeira demonstra o terreno nivelado onde o silo é instalado. O material utilizado para obter a escada é o PVC, sendo cortado em tiras, formando assim a geometria do guarda corpo e colunas da escada, sendo fixada ao corpo e à tampa com parafusos para que se possa remover de acordo com a análise.

As fixações entre os componentes são consideradas nós engastados, ou seja, sem movimentação nos três planos da dimensão.

O protótipo será posicionado dentro do módulo do túnel de vento (Figura 5(a)), onde o fluido passará liso, sem turbulência, pelo modelo. Foram utilizados, para medição da carga de arrasto, uma balança digital de 0,01 g de precisão da marca Weblabor® (Figura 5(b)) e, para a medição da velocidade e temperatura do ar no momento do teste um anemômetro com tubo pitot e manômetro diferencial da marca Extech® HD-350, como pode-se ver na Figura 5(c).

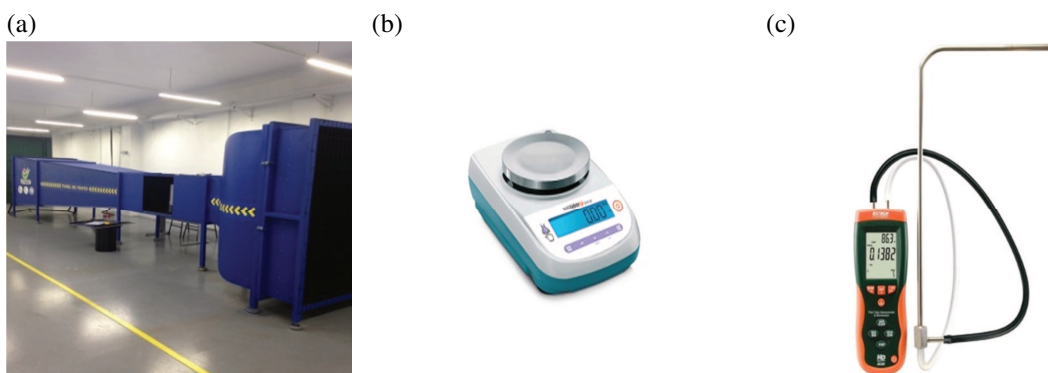


Figura 5. Equipamentos utilizados: (a) túnel de vento (Fonte: autores, 2019), (b) balança analítica (Weblabor®, 2019), (c) anemômetro com tubo pitot e manômetro diferencial (Extech®, 2019).

A Figura 6 mostra a montagem do experimento. Na parte superior do protótipo é fixado um grampo para a amarração feita com a linha 10, que sai do módulo do túnel de vento, em ângulo, por um furo de diâmetro 13 mm, até uma roldana presa a um suporte posicionado acima do módulo do túnel de vento. Abaixo do suporte está posicionada, perpendicular ao módulo central do túnel de vento, a balança digital, com um peso de 2100 g amarrado à linha 10.

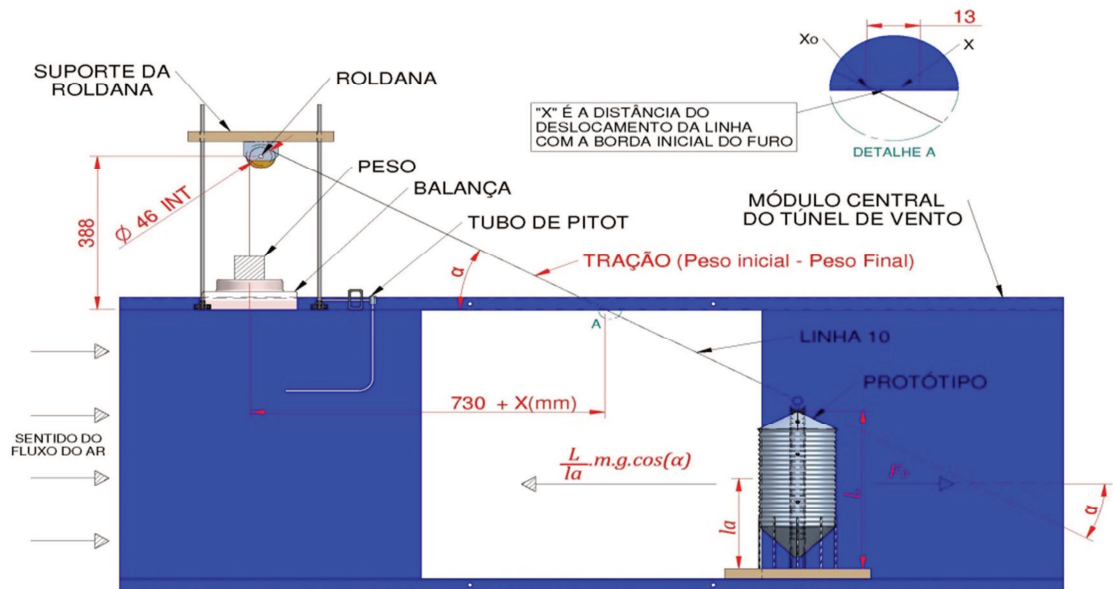


Figura 6. Layout do protótipo no túnel de vento (Fonte: autores, 2019).

Os métodos utilizados compreendem a análise dimensional e a teoria da semelhança física, e técnicas de ensaios em túnel de vento para medições do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds. Estão definidas no modelo físico reduzidos, que são fundamentais para a comparação das ações das cargas na escada, a ação do vento sobre silos em escala real e a ação do vento gerado em túnel de vento sobre o modelo reduzido do silo. Foram realizados três testes a cada ângulo de posicionamento da escada, 0°, 45°, 90°, 135° e 180°, e três testes sem a escada, conforme Figura 7.

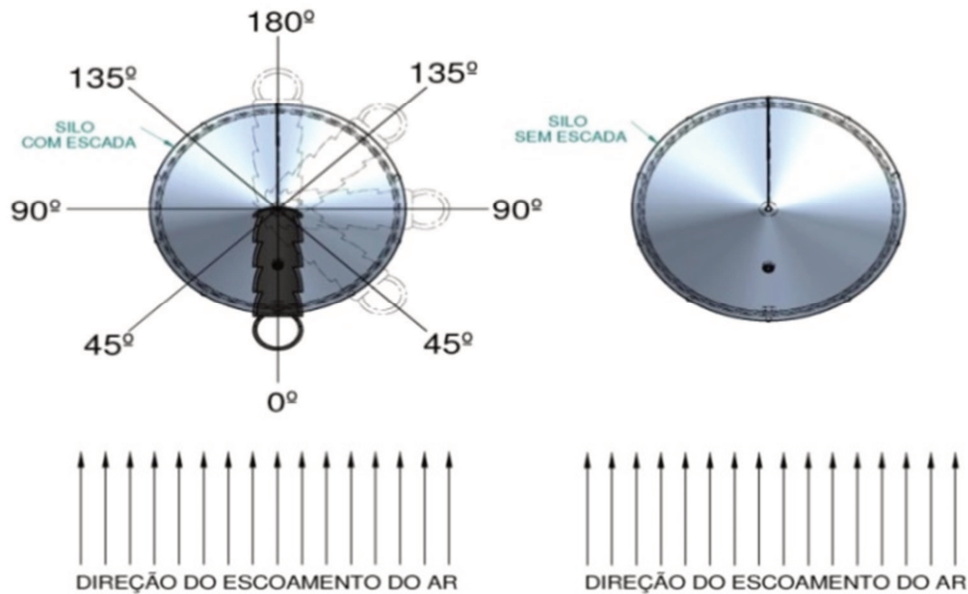


Figura 7. Posicionamento da escada do protótipo no túnel de vento (Fonte: autores, 2019).

As medições das velocidades e da temperatura do escoamento de ar foram feitas com anemômetro, e os resultados foram obtidos em velocidades pré-determinadas. A cada aumento de velocidade a força de arrasto aumenta, gerando assim uma carga (tração) na linha 10, que foram medidos com a diferença de carga (peso final – peso inicial) na balança.

Com a atuação do vento, consequentemente, gera-se um momento ao protótipo e, assim um deslocamento (X), que foi medido com paquímetro. Ao gerar esse deslocamento, o ângulo da linha 10 em relação à direção do vento varia, obtendo-se assim um ângulo (α) em relação ao módulo central do túnel de vento.

Por meio de um diagrama, foi calculada a força de arrasto, que é a componente da força paralela à direção do escoamento, conforme Equação 1:

$$F_D = \frac{L}{l_a} m. g. \cos(\alpha) \quad (1)$$

em que:

F_D = força de arrasto (N);

L = altura total do protótipo (m);

l_a = altura da base ao centro de massa do protótipo (m);

m = massa resultante da tração da linha 10 (kg);

g = força gravitacional (m/s^2);

α = ângulo da velocidade analisada (conforme Figura 6).

Segundo Ivo (2010), o coeficiente de arrasto é usado para quantificar a resistência de um objeto durante a passagem de um fluido. O valor não é constante, pois depende então do número de Reynolds para ser analisado.

Com a Equação 2, calcula-se então o coeficiente de arrasto:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (2)$$

em que:

C_D = coeficiente de arrasto;

ρ = massa volumétrica (kg/m^3);

v = velocidade média do fluido (m/s);

A = área frontal de referência (m^2).

Conforme Ivo (2010), o número de Reynolds correlaciona os comportamentos inercial e viscoso durante o fluxo do ar. Um número de Reynolds muito baixo indica um movimento essencialmente viscoso, em que os efeitos de inércia são desprezáveis. Já um número de Reynolds elevado refere-se a um fluxo dominado pelas forças de inércia, que decorre frequentemente em regime turbulento. Não se pode dizer quais são os valores dos números de Reynolds baixos ou altos porque eles dependem da geometria. O número de Reynolds é calculado conforme Equação 3.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3)$$

em que:

Re = número de Reynolds;

D = diâmetro do cilindro (m);

μ = viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s).

Neste trabalho, serão analisados, graficamente, os coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds.

Freire (1990) citou que Prandtl, em 1904, mostrou como seria possível analisar escoamentos levando-se em conta os efeitos viscosos. A partir de algumas considerações teóricas e de vários experimentos simples, ele mostrou que o escoamento ao redor de um corpo pode ser dividido em duas regiões: uma camada fina ao redor do corpo chamada de camada limite, onde as forças viscosas são importantes, e uma região externa ao corpo onde as forças viscosas podem ser desprezadas, conforme a Figura 8.

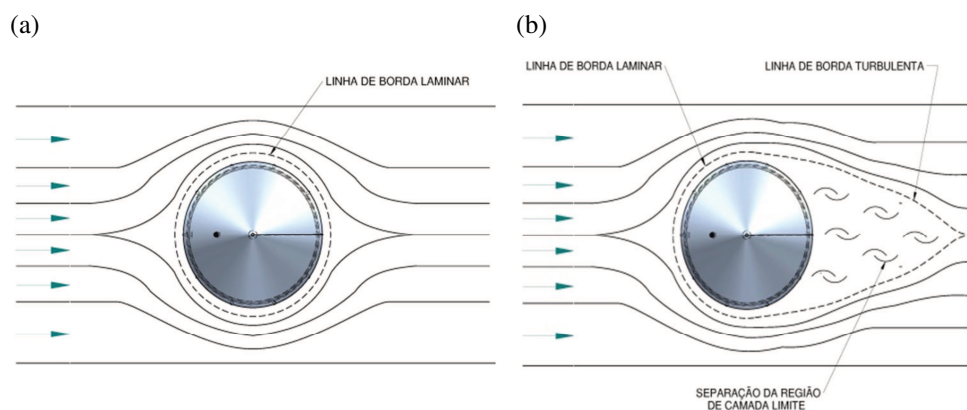


Figura 8. Escoamento do ar no silo em função do número de Reynolds: (a) escoamento com baixo número de Reynolds (Fonte: autores, 2019), (b) escoamento com alto número de Reynolds (autores, 2019).

Resultados e discussões

Foram realizados três testes a cada posicionamento da escada do silo no túnel de vento no laboratório de vibrações da UNESC nos dias 14 e 21 de outubro de 2019 das 19h às 22.

Os testes do silo com a escada, nas posições 0° a 180° foram finalizados todos no dia 14, enquanto que o silo sem a escada no dia 21. Os resultados foram diferentes em decorrência das temperaturas e pressões variadas durante os testes, devido à variação climática, mesmo com as mesmas posições e velocidades, conforme os gráficos das Figuras 9, 10 e 11.

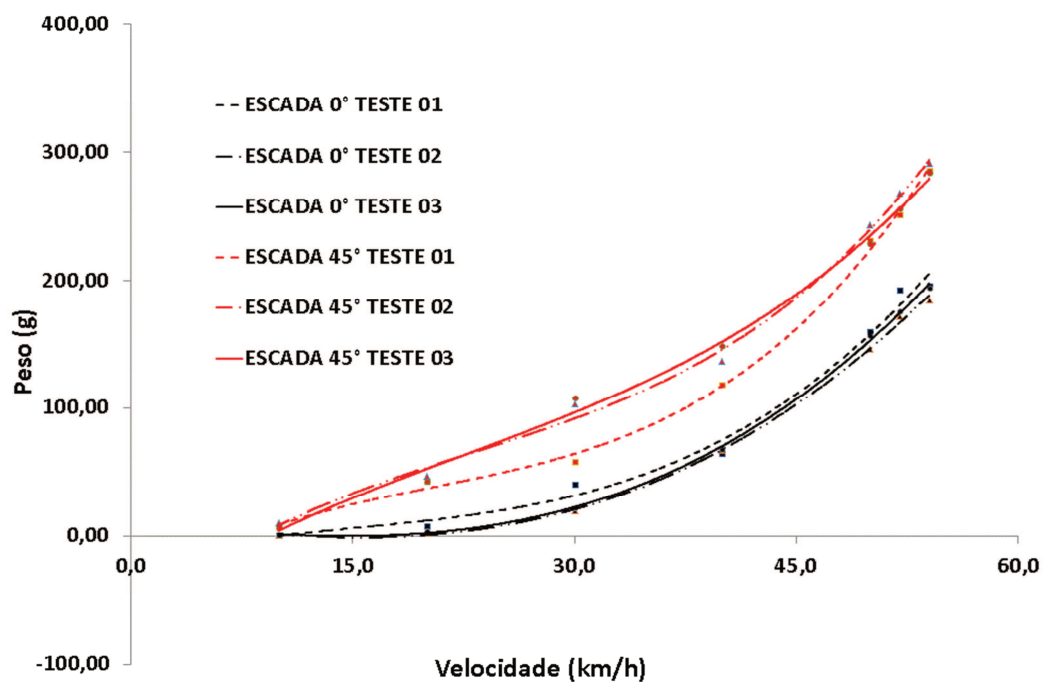


Figura 9. Gráfico do peso vs. velocidade das posições 0° e 45° (Fonte: autores, 2019).

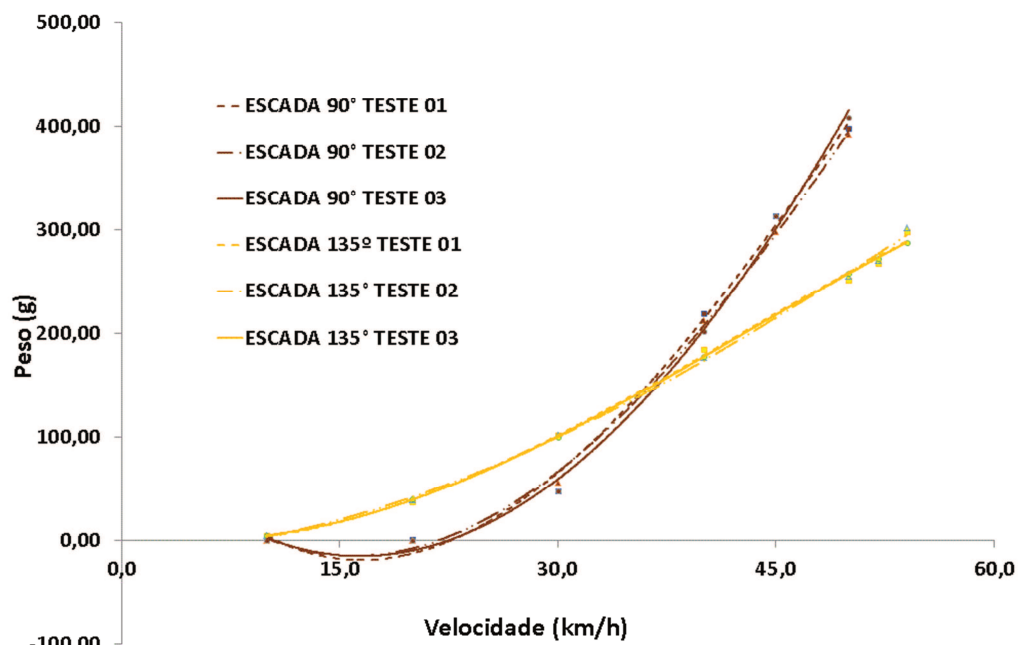


Figura 10. Gráfico do peso vs. velocidade das posições 90° e 135° (Fonte: autores, 2019).

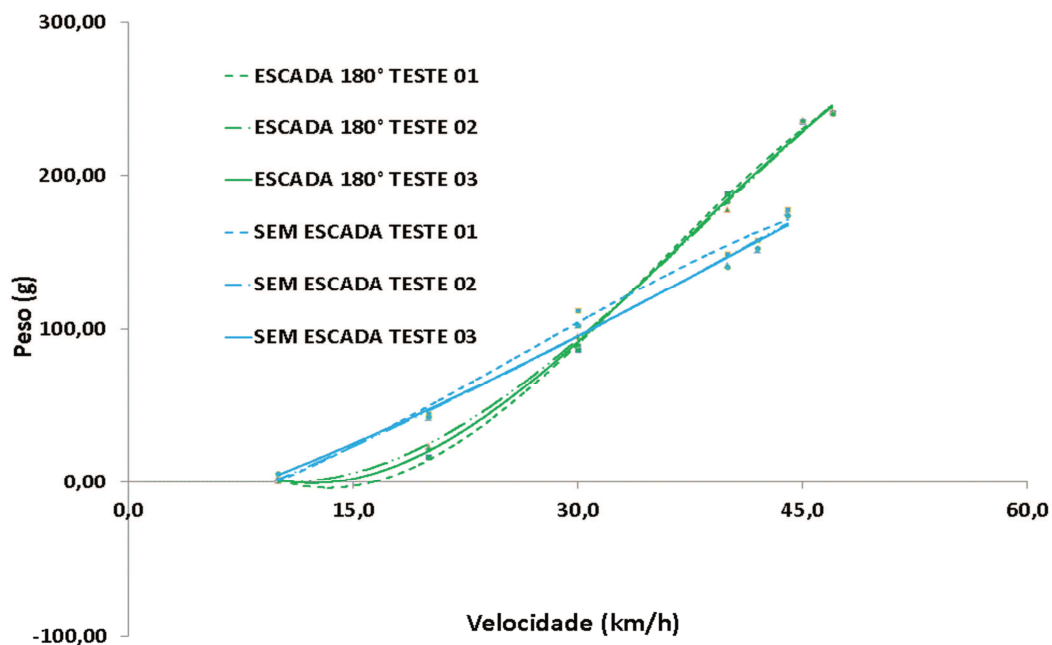


Figura 11. Gráfico do peso vs. velocidade das posições 180° e sem escada (Fonte: autores, 2019).

Os gráficos mostram a linha de tendência da carga em função da velocidade. Cada posicionamento da escada estudado é mostrado com diferentes cores, e a cada teste um tipo de linha para melhor visualizar e comparar os gráficos. A realização de três ensaios por posição demonstrou uma boa repetibilidade nos testes, já que os resultados das cargas tiveram valores próximos.

Observa-se que, para algumas curvas, tem-se valores negativos para a posição 90° da escada, o que é fisicamente inconsistente, porém isso ocorre devido ao ajuste polinomial da curva. Isto é um resultado puramente matemático, pois é sabido que inexitem resultados físicos com força negativa. A Figura 12 mostra os resultados médios dos três ensaios para cada uma das posições, mantendo-se os padrões de cores das figuras anteriores.

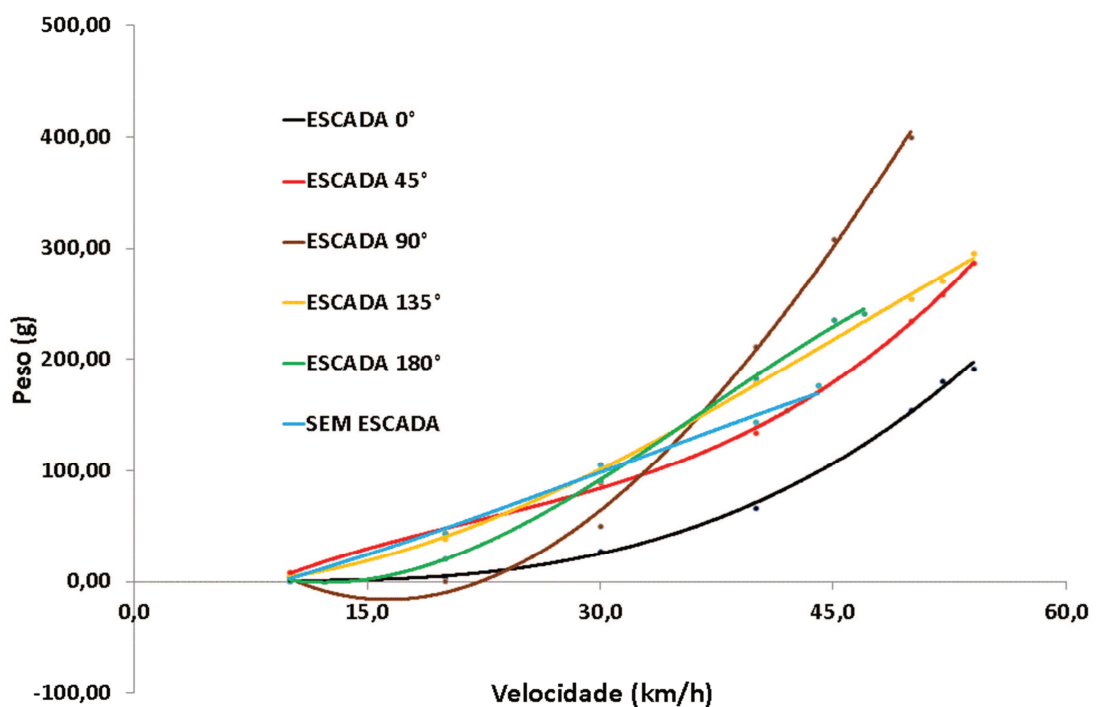


Figura 12. Gráfico do peso médio dos testes vs. velocidade (Fonte: autores, 2019).

Em todos os testes, não chegou-se à velocidade máxima do túnel de vento devido ao peso do protótipo que, por ser leve em relação à área de contato com o vento, resultou na perda da estabilidade local e global, fazendo com que o protótipo saísse da bancada, interrompendo a leitura dos dados. Assim, o posicionamento do silo sem a escada é o que teve a menor velocidade máxima em seus testes, com 44 km/h, o que dá indício que o silo sem a escada é o pior caso.

Mediante os resultados, observou-se que a menor carga ocorre com a escada a 90° entre as velocidades de 20 e 25 km/h, e em velocidades altas ocorre a maior carga comparada com as outras posições. A menor carga ocorre com a escada posicionada a 0° em velocidades altas, o que era esperado também devido à sua geometria.

Com os resultados dos valores das cargas em função da velocidade, foram calculados os coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds, conforme vê-se no gráfico da Figura 13.

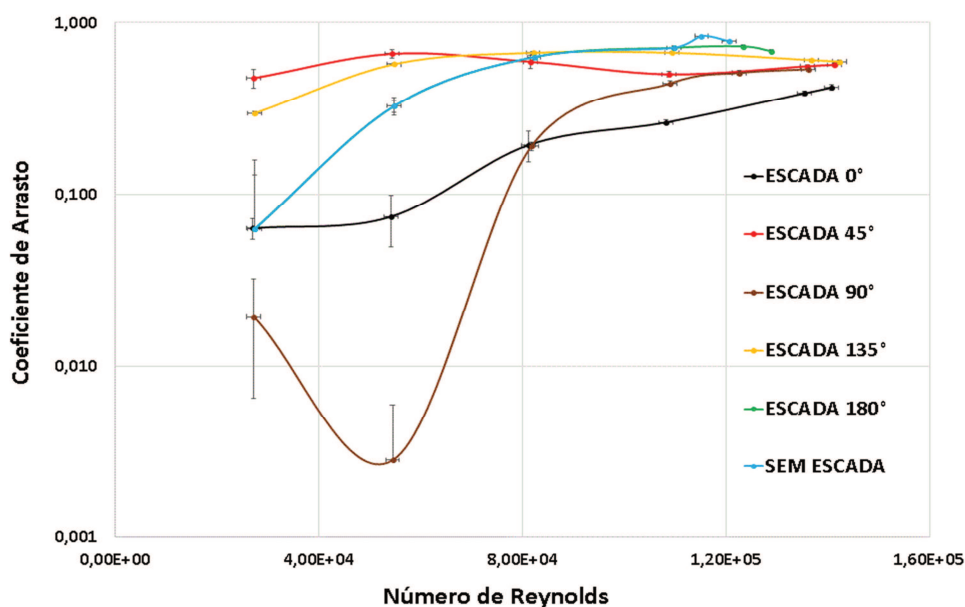


Figura 13. Gráfico do coeficiente de arrasto vs. número de Reynolds (Fonte: autores, 2019).

O gráfico mostra pontos com fatores de erros, que está relacionado ao deslizamento do protótipo na bancada devido à força do vento e também pela vibração do motor no túnel de vento.

Para números de Reynolds abaixo de 70000, a escada a 90° é a que apresentou o melhor desempenho aerodinâmico, com o menor coeficiente de arrasto em comparação aos outros posicionamentos, e foi também a posição em que ocorreu o maior erro em sua leitura, devido à escada estar no ângulo máximo perpendicular ao fluxo, e de maior área de contato com o vento, fazendo seu assentamento na bancada. Nesta condição de fluxo, a escada a 45° e 135° foram os que tiveram os maiores coeficientes de arrasto.

A partir de $Re\ 70000$, alguns resultados invertem-se e a escada posicionada a 0° é a que resulta no menor coeficiente de arrasto. Em número de Reynolds acima de 80000, os testes com o silo sem a escada e com a escada a 180° foram os que resultaram nos maiores coeficientes de arrastos. Ambos os casos tiveram o mesmo comportamento em boa parte do gráfico, exatamente como esperado.

A escada na posição 0° traz um desempenho aerodinâmico mais eficiente devido à geometria ondulada do guarda corpo da escada paralela ao sentido do escoamento do ar. Assim, em número de Reynolds 110000, ocorre uma redução de 45% no seu coeficiente de arrasto, comparada com o silo sem a escada. A escada a 90° , mesmo sendo a posição de maior área de influência direta com o vento e o posicionamento de maior superfície rugosa, teve um desempenho bom. Os posicionamentos da escada 45° e 135° tiveram seus coeficientes intermediários se comparados com as outras posições.

A escada na posição 180° traz resultados e semelhanças geométricas em relação à posição do silo sem escada, e isso ocorre devido ao posicionamento estar em uma região da separação da camada limite, não tendo influência direta do vento.

Conclusões

O presente trabalho apresentou um estudo experimental da ação de forças da escada de acesso a um silo fundo cônico elevado do modelo *SFC* 4508 em escala reduzida 1/30 no túnel de vento.

É conclusivo afirmar que o baixo coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds é a melhor situação para a estrutura do silo. Como é o caso das posições das escadas a 0° e 90° que desde os ventos de velocidades baixas até altas, vem trazendo um coeficiente de arrasto baixo comparado a outras posições. E também foi verificado que a falta de rugosidade em torno do silo (escada de acesso), como no caso dos posicionamentos sem a escada e com ângulo de 180°, leva a um coeficiente de arrasto maior, gerando assim uma força maior no silo com atuação de vento, comparando-se a todas as outras posições.

De modo geral, o resultado mostra que a escada em torno do silo, caso tenha influência direta do vento, diminui o coeficiente de arrasto e, conseqüentemente, a sua força de arrasto também. Assim para um cálculo estrutural, ter-se-ia nos uma menor carga de vento, comparada com o silo sem a escada e com a posição 180°.

Devem-se explorar mais os campos de pesquisas para superfícies rugosas em corpos cilíndricos para a redução do arrasto da estrutura, o que ocasiona uma carga menor nas reações engastadas.

Deste modo, como temas de artigos futuro, sugere-se analisar a diferença das cargas nas reações da estrutura metálica que sustenta o silo para os coeficientes de arrastos da escada citados neste artigo. Também sugere-se extrapolar os resultados aqui obtidos para o dimensionamento de uma estrutura em tamanho real.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800:** Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **TB-374:** Silos cilíndricos para grãos vegetais. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **TB-377:** Componentes de silos cilíndricos metálicos para grãos vegetais. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762:** Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

AUSTRALIAN STANDART **AS 3774.** Loads on bulk containers. Sydney. AS 3774 Supplement 1. Sydney, 1997.

BRASIL. Ministério do trabalho e emprego. **NR-12:** Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos. 2017.

CALIL, Carlito Jr. CHEUNG, Andrés Batista. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo.** Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005, 240p.

EUROCODE 1. **Basis of design and actions on structures. Actions in silos and tanks,** Part 4, ENV 1995.

FREIRE, A. P. **Teoria de Camada Limite.** Programa de Engenharia Mecânica: Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1990.

Fox, R.W., McDonald, A.T. e Pritchard, P.J., **“Introdução à Mecânica dos Fluidos”**, Sexta Edição, LTC Editora, 2006.

INDUSTRIAL PAGÉ LTDA, **Manual de Utilização Silos**, 2015a.

INDUSTRIAL PAGÉ LTDA, **Manual de Montagem Silo Fundo Cônico**, 2015b.

PALMA, Giovano. **Pressões e fluxos em silos esbeltos ($h/d \geq 1,5$)**. Dissertação Mestrado em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005, 121p. Artigo de vento.

PEREIRA, I. A. B. B. **Escoamento Turbulento em torno de um Cilindro a Baixo Número de Reynolds “Comparação entre modelos Turbulentos”**. 2010. 63 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.